

Forschungsberichte aus dem  
wbk Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer  
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza  
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Simon-Frederik Koch

**Fügen von Metall-Faserverbund-  
Hybridwellen im Schleuderverfahren**  
– ein Beitrag zur fertigungsgerechten  
intrinsischen Hybridisierung

Band 203



**Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen  
im Schleuderverfahren**

—

**ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung**

Zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der Ingenieurwissenschaften**

der Fakultät für Maschinenbau

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte

**Dissertation**

von

Dipl.-Ing. Simon-Frederik Koch

aus Bielefeld

Tag der mündlichen Prüfung: 19.06.2017

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Maik Gude

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5441-5

ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort des Herausgebers**

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze



## **Vorwort des Verfassers**

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Akademischer Mitarbeiter des wbk Institut für Produktionstechnik (Karlsruher Institut für Technologie).

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer möchte ich danken für die Übernahme des Hauptreferats. Die offene Diskussionen, guten Ratschläge und das entgegengebrachte Vertrauen haben mich viel gelehrt, die Arbeit am wbk vereinfacht und mir beim Erstellen der Dissertation sehr geholfen. Meinem Korreferenten Prof. Dr.-Ing. habil. Maik Gude möchte ich ebenfalls meinen Dank aussprechen, insbesondere für die gute Zusammenarbeit im Schwerpunktprogramm 1712 (SPP1712).

Einige ausgewählte Ergebnisse dieser Dissertation wurden in dem Projekt „Modell- und Verfahrensentwicklung zur Herstellung hybrider Profile mittels Schleuderverfahren“, welches innerhalb des SPP1712 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert wird, und in dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekt „ProLemo: Produktionstechnologien für effiziente Leichtbaumotoren für Elektrofahrzeuge“ erarbeitet. Diesen Förderträgern sei an dieser Stelle gedankt.

Mein ganz besonderer Dank gilt allen Mitarbeitern des wbk, insbesondere der Werkstatt um Michael Heinz, Manfred Raab, Thomas Hildenbrand, Dietmar Jörger und Björn Gebhard. Ohne eure Unterstützung und Rat wären die vielen Experimente nicht so erfolgreich verlaufen. Ganz herzlichen Dank auch an die Gruppe MAP: die vielen Stunden, Tage, Wochen, Monate und Jahre am Institut sind mir durch euch leicht gefallen. Es sind Freundschaften entstanden, die ich nicht missen möchte. Neben der moralischen Unterstützung möchte ich Dank aussprechen für fachliche Hinweise und Diskussionen, besonders Jörg Bauer, Henning Wagner, Sebastian Haag, Andreas Spohrer, Sven Coutandin, Marius Dackweiler und Paul Ruhland. Den zahlreichen ehemaligen Studenten und Abschlussarbeitern danke ich für gute, konstruktive Zusammenarbeit.

Meinen Eltern danke ich für die Jahre der bedingungslosen Unterstützung, für das Bekräftigen bei wichtigen Entscheidungen und dem Antrieb, den Sie mir geben meine Wünsche und Ziele zu verfolgen.

Zuletzt möchte ich meiner Ehefrau Ulrike meinen tiefen Dank aussprechen. Deine Ruhe und Gelassenheit strahlen auch auf mich ab und geben mir die Kraft kommende Aufgaben zu meistern. Auch in schwierigen Zeiten hast du mit viel Geduld, Vernunft und Empathie zu mir gehalten. Deine Liebe ist für mich unersetzlich!

Karlsruhe, im Frühjahr 2017

Simon-Frederik Koch





## Abstract

A shortage of resources and the increasing demand of energy efficient technological systems constitutes a trend that creates challenges, especially for companies operating in the field of mobility and automation industries. In this context, advances in innovative drive technologies are in focus, since new solutions in this area promise improved energy efficiency for both sectors. Lightweight design offers an energy and resource saving approach, especially in moving parts of a drive system, such as the drive shaft.

The centrifugal casting process which is addressed in this work represents an approach for producing lightweight drive shafts. Own studies have shown that metal inserts can be connected to the evolving hollow structure made of fiber reinforced plastic (FRP) during the centrifugal casting process. Light drive shafts often require a multi-material design in order to introduce high local loads into the shafts via the metal but also to transfer the loads over long distances via the FRP. The centrifugal casting process and the joining of the metal during that process promise a simplified process chain and offer new weight saving potential.

Centrifugal forces are applied during processing to impregnate the dry fiber structure. If metals need to be connected in this process, also axial flow paths appear alongside the radial ones. Whereas the widely understood radial impregnation is proceeding relatively fast due to the radial centrifugal forces, the axial impregnation mechanisms have not yet been sufficiently investigated. This work addresses this issue.

A model will be derived describing the impregnation of dry fiber structures when inserts are intrinsically joined during the centrifugal casting. It allows predicting the impregnation duration so that the process can be adjusted by setting its parameters. The derived model was validated with a design of experiments approach and a study of the sensitivity. For allowing the centrifugal casting process to be applied as a joining method, an infiltration unit was also developed that mixes the resin with the hardener and is dosing and distributing it along a definable path automatically inside the mold. Furthermore, the basics for venting the arising undercut connection were created by theoretical and experimental analyses. In this context, also centrifugal casting with a core has been developed and its physical principles have been modeled mathematically. The core needs to be dimensioned according to the geometrical and material characteristics. Findings with this process variant show that a higher fiber volume contents can be obtained and even non-circular FRP profiles without resin-rich spots can be manufactured.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation	1
1.2 Aufbau der Arbeit	3
<b>2 Stand von Forschung &amp; Technik: Herstellung von hybriden FVK-Metall-Wellen und -profilen</b>	<b>4</b>
2.1 Verfahren zur Herstellung von metallischen Hohlwellen	7
2.2 Verfahren zur Herstellung von FVK-Wellen und -profilen	10
2.2.1 Direkt- und Prepregverfahren zur Herstellung hohler FVK-Wellen	11
2.2.2 Preformingverfahren für hohlförmige Faserstrukturen	13
2.2.3 Flüssigimprägnierprozesse	15
2.3 Verfahren zur Herstellung von hybriden Metall-FVK-Wellen	22
2.3.1 Extrinsische Verbindungstechnik	22
2.3.2 Intrinsische Verbindungstechnik	26
2.3.3 Schleuderverfahren als intrinsische Verbindungstechnik	28
2.4 Bewertung des Standes von Forschung und Technik	35
2.4.1 Zusammenfassung	35
2.4.2 Vorteile & Defizite des Schleuderverfahrens als intrinsische Verbindungstechnik	36
<b>3 Zielsetzung &amp; Vorgehensweise</b>	<b>41</b>
<b>4 Tränkungsverfahren bei Faserverstärkten Kunststoffen</b>	<b>46</b>
4.1 Grundlagen der Tränkung von Faserstrukturen	46
4.2 Tränkungsmodell für das Schleuderverfahren	51
<b>5 Modell zur Berechnung der Tränkungszeit</b>	<b>56</b>
5.1 Modellbildung und -annahmen	56
5.2 Druck	61
5.2.1 Druckanteil der Matrix infolge von Zentrifugalwirkung	61

5.2.2	Druckanteil infolge von Kapillarwirkung	71
5.2.3	Zusammenfassung: Resultierender Gesamtdruck	74
5.3	Permeabilität	75
5.3.1	Permeabilität unidirektionaler Faserstrukturen	75
5.3.2	Permeabilität inhomogener Faserstrukturen	78
5.4	Viskosität	85
5.5	Grundgleichung für die Tränkung mit radialen & axialen Fließwegen	87
5.5.1	Grundgleichungen der einzelnen Tränkungsschritte	87
5.5.2	Zusammenfassung: Einflussparameter auf die Tränkungsdauer	90
<b>6</b>	<b>Entwicklung des Schleuderverfahrens für die intrinsische Hybridisierung</b>	<b>94</b>
6.1	Entwicklung der Maschinenteknik	94
6.1.1	Infiltrationseinheit	96
6.1.2	Werkzeugtechnologie für das intrinsische Fügen	100
6.2	Entwicklung einer Gestaltungsrichtlinie für Entlüftungsbohrungen	104
6.2.1	Theorie: Positionierung von Entlüftungsbohrungen und Bohrmustern	104
6.2.2	Experimentelle Untersuchungen	106
6.2.3	Ableitung einer Gestaltungsrichtlinie	113
6.3	Entwicklung des Schleuderverfahrens mit Kern	115
6.3.1	Konzepte zum Aufbau von Kernen & deren Bewertung	116
6.3.2	Schleuderverfahren mit Kern bei Zylindern	119
6.3.3	Schleuderverfahren mit Kern bei Polygonen	143
6.3.4	Tränkungsmechanismen beim Schleuderverfahren mit Kern	152
<b>7</b>	<b>Validierung des Tränkungsmodells</b>	<b>155</b>
7.1	Quantifizierung von Modellparametern & Sensitivitätsanalysen	155
7.1.1	Randbedingungen	156
7.1.2	Einfluss der Schwankung physikalischer Modellparameter & deren Auswirkungen auf die Tränkungsdauer	158
7.1.3	Einfluss von Geometrie, Faserorientierung, Drehzahl & Temperatur auf die Tränkungsdauer	169

---

7.2	Versuchsdurchführung & Auswertung	172
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung &amp; Ausblick</b>	<b>177</b>
8.1	Zusammenfassung	177
8.2	Ausblick	180
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>I</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XVIII</b>
	<b>Anhang</b>	<b>XXVI</b>

## Abkürzungen

Formelzeichen	Größe	Einheit
CAD	Computer Aided Design	
CAE	Computer Aided Engineering	
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff	
CT	Computertomograph(-ie)	
EP	Epoxidharz	
FEM	Finite-Elemente	
FEM	Finite-Elemente-Methode	
FVK	Faserverstärkter Kunststoff	
FVG	Faservolumengehalt	
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff	
IHU	Innenhochdruckumformung	
KIT	Karlsruher Institut für Technologie	
LCM	Liquid Composite Moulding (deutsch: Flüssigimprägnierverfahren)	
PA	Polyamid	
Pb	Blei	
PKW	Personenkraftwagen	
RTM	Resin-Transfer-Moulding (deutsch: Harzinfusionsverfahren)	
TER	Thermoplastisches, endlosfaserverstärktes Rohr	
TG	Toleranzgruppe (DIN 16742)	
VARI	Vacuum Assisted Resin-Infusion	
VARTM	Vacuum Assisted Resin-Transfer-Moulding	
$A_{eff}$	Effektiv durchströmte Querschnittsfläche	[mm <sup>2</sup> ]
$A_{form}$	Querschnittsfläche der Kavität	[mm <sup>2</sup> ]
$a_n$	Funktionsparameter für Näherungsfunktionen für die Viskosität ( $n = 1..4$ )	

$a_0$	Faserbündelhalbachse (lange Achse)	[mm]
$\mathbf{b}$	Volumenlastvektor	[m/s <sup>2</sup> ]
$b_0$	Faserbündelhalbachse (kurze Achse)	[mm]
$c$	Konstante aus Gebart-Modell	[-]
$C_1$	Konstante aus Gebart-Modell	[-]
$d_f$	Faserdurchmesser	[mm]
$d_o$	Außendurchmesser des FVK-Rohres	[mm]
$E$	Elastizitätsmodul	[GPa]
$E_c$	Elastizitätsmodul des Kerns	[GPa]
$f$	Fitnessfunktionswert	[bar]
$g$	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
$h_i$	Schichtdicke der Lage $i$ in einem Laminat	[mm]
$L$	Länge / Fließweg	[mm]
$l_{ax}$	Axiale Überlapplänge zwischen Metall und FVK	[mm]
$l_{ges}$	Gesamtlänge des FVK-Rohres	[mm]
$l_r$	Freie Länge des FVK-Anteil	[mm]
$M$	Dimensionierungsindex	[MPa · m / kg]
$m_m$	Masse der Matrix (auch: Definierte Harzmenge)	[kg]
$n$	Drehzahl	[U/min]
$n_{min}$	Minstdrehzahl	[U/min]
$p$	Druck	[bar]
$p_{ca}$	Kapillardruck	[bar]
$p_{ca,\parallel}$	Longitudinaler Kapillardruck	[bar]
$p_{ca,\perp}$	Transversaler Kapillardruck	[bar]
$p_{co}$	Druck des Kerns	[bar]
$p_{co,i}$	Druck des Kerns am $i$ -ten Knoten	[bar]
$\bar{p}_{co}$	Gemittelter Druck des Kerns	[bar]

$p_i$	Eingangsdruck	[bar]
$p_o$	Ausgangsdruck	[bar]
$p_m$	Matrixdruck infolge der Zentrifugalwirkung	[bar]
$p_{m,dick}$	Matrixdruck infolge der Zentrifugalwirkung, Ansatz nach (Ehleben 2002) für dickwandige Rohre	[bar]
$p_{m,dünn}$	Matrixdruck infolge der Zentrifugalwirkung, Ansatz nach (Ehleben 2002) für dünnwandige Rohre	[bar]
$p_{m,norm}$	Druck infolge der Zentrifugalwirkung, normiert	[bar]
$r$	Radius	[mm]
$r_{\ddot{a}q}$	Äquivalenter (Faserbündel-)Radius	[mm]
$r_{c,i}$	Innenradius des Kerns	[mm]
$r_{c,o}$	Außenradius des Kerns	[mm]
$r_{eff}$	Effektiver Faserradius	[mm]
$r_{eff,makro}$	Effektiver, makroskopischer Faserradius	[mm]
$r_{eff,mikro}$	Effektiver, mikroskopischer Faserradius	[mm]
$r_{fil}$	Filamentradius	[ $\mu\text{m}$ ]
$r_{fillet}$	Rundungsradius	[mm]
$r_i$	Innenradius des FVK-Rohres	[mm]
$r_{m,i}$	Matrixinnenradius	[mm]
$r_{m,i0}$	Matrixinnenradius zum Zeitpunkt $t = 0$	[mm]
$r_o$	Außenradius des FVK-Rohres	[mm]
$r(t)$	Position der radialen Tränkungsfront	[mm]
$s$	Wandstärke des Laminats / Laminatdicke	[mm]
$s_c^*$	Normierte Wandstärke des Kerns	[%]
$s_p$	Wandstärke der Schutzschicht des Kerns	[mm]
$S$	Permeabilität	[ $\mu\text{m}^2$ ]
$S_{\parallel}$	Longitudinale Permeabilität	[ $\mu\text{m}^2$ ]
$S_{\perp}$	Transversale Permeabilität	[ $\mu\text{m}^2$ ]
$S_{\perp,makro}$	Transversale, makroskopische Permeabilität	[ $\mu\text{m}^2$ ]

$S_{L,mikro}$	Transversale, mikroskopische Permeabilität	$[\mu\text{m}^2]$
$S_x$	Permeabilität in x-richtung	$[\mu\text{m}^2]$
$S_{zz}$	Permeabilität in z-richtung	$[\mu\text{m}^2]$
$S_{zz,makro}$	Makroskopische Permeabilität in z-richtung	$[\mu\text{m}^2]$
$t$	Zeit	[s]
$t_i$	Dauer des i-ten Tränkungsschrittes	[s]
$t_{ges}$	Gesamtränkungsdauer	[s]
$T$	Temperatur	
$u_r$	Radiale Verschiebung	[mm]
$v$	Geschwindigkeit	[mm/s]
$v_r$	Radiale Fließgeschwindigkeit	[mm/s]
$v_{r,m}$	Radiale Fließgeschwindigkeit im Bereich reiner Matrix	[mm/s]
$v_{r,f}$	Radiale Fließgeschwindigkeit im Bereich des fasergefüllten Anteils	[mm/s]
$v_z$	Axiale Fließgeschwindigkeit	[mm/s]
$v_{z,i}$	Axiale Fließgeschwindigkeit am Strömungseintritt	[mm/s]
$V$	Volumen	$[\text{cm}^3]$
$V_{ges}$	Gesamtvolumen	$[\text{cm}^3]$
$V_{fb}$	Volumen der Faserbündel	$[\text{cm}^3]$
$V_{fil}$	Volumen der Filamente	$[\text{cm}^3]$
$V_m$	Matrixvolumen	$[\text{cm}^3]$
$\dot{V}$	Volumenstrom	$[\text{cm}^3/\text{s}]$
$z(t)$	Position der axialen Tränkungsfront	[mm]
$\nabla$	Gradient	
$\alpha$	Faserorientierung	$[\text{°}]$
$\varepsilon$	Deformationstensor	[-]
$\varepsilon_{tear}$	Reißdehnung	[%]
$\mu$	Viskosität	$[\text{mPa} \cdot \text{s}]$
$\vartheta_f$	Faservolumengehalt	[%]

---

$\vartheta_{f,gl}$	Globaler Faservolumengehalt	[%]
$\vartheta_{f,makro}$	Makroskopischer Faservolumengehalt	[%]
$\vartheta_{f,mikro}$	Mikroskopischer Faservolumengehalt	[%]
$\vartheta_{f,max}$	Maximaler Faservolumengehalt	[%]
$\vartheta_{f,max,hex}$	Hexagonal dichtest gepackte Faserstruktur	[%]
$\vartheta_{f,max,quadr}$	Quadratisch dichtest gepackte Faserstruktur	[%]
$\vartheta_{fil}$	Füllvolumengehalt (des Füllstoffes)	[%]
$\vartheta_m$	Matrixvolumengehalt	[%]
$\theta$	Kontaktwinkel zwischen Luft, Matrix, Faser	[°]
$\nu$	Querkontraktionszahl	[-]
$\nu_c$	Querkontraktionszahl des Kerns	[-]
$\rho$	Dichte	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_c$	Dichte des Kerns (Verbunddichte)	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_{fil}$	Dichte des Füllstoffs (für den Kern)	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_m$	Dichte der Matrix	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Oberflächenspannung	[N/m]
$\tau$	Normierte Wandstärke	[%]
$\tau_{ax}$	Axialer Tränkungsfortschritt	[%]
$\tau_r$	Radialer Tränkungsfortschritt	[%]
$\phi$	Porengehalt	[%]
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit	[rad/s]

---